



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

IDEÁLNÍ CYKLY SPALOVACÍCH MOTORŮ

IDEAL CYCLES OF COMBUSTION ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tibor Kertész

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Tibor Kertész**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Ideální cykly spalovacích motorů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Obsahem závěrečné bakalářské práce je komplexní studium, rozbor a vlastní hodnocení ideálních termodynamických cyklů spalovacích motorů.

Cíle bakalářské práce:

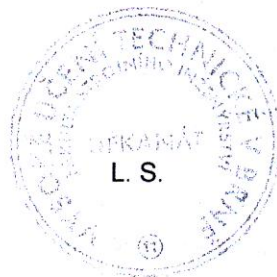
Práce bude obsahovat výpočet potřebných parametrů, p-V a T-S diagramy následujících ideálních termodynamických cyklů: Otto, Diesel, Sabate, Carnot, Stirling a porovnání jednotlivých cyklů mezi sebou se zdůrazněním jejich předností a nedostatků.

Seznam doporučené literatury:

MACEK, Jan. Spalovací motory, ČVUT Praha, 2. vydání, 2012, 262 stran, ISBN: 978-80-0105-015-6

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 26. 10. 2017



prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá shrnutím základních teoretických poznatků ideálních termodynamických oběhů a vytvořit jejich matematické modely v Matlabu pro výpočet a vykreslení diagramů jednotlivých cyklů. Na základě vypočtených hodnot bylo možné porovnat jednotlivé oběhy mezi sebou.

KLÍČOVÁ SLOVA

termodynamický děj, Ottův cyklus, Dieselův cyklus, Sabateův cyklus, Carnotův cyklus, Stirlingův cyklus, p-V diagram, T-S diagram

ABSTRACT

The main subject of this bachelor's thesis is to summarize basic theoretical knowledge of ideal thermodynamic cycles and to develop their mathematical models in Matlab to calculate and draw diagrams of each cycle. Based on the calculated values, it was possible to compare the cycles with each other.

KEYWORDS

thermodynamic cycle, Otto cycle, Diesel cycle, Sabate cycle, Carnot cycle, Stirling cycle, p-V diagram, T-S diagram

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KERTÉSZ, T. *Ideální cykly spalovacích motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 44 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2018

.....

Tibor Kertész

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Zdeňku Kaplanovi, CSc. za odborné vedení mé práce, podmětné připomínky a cenné rady, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce. Dále musím poděkovat i svým nejbližším, že mě po celou dobu tvorby práce podporovali.

Obsah

1 Úvod	14
2 Vstupní parametry	15
3 Ottův cyklus	16
3.1 Historie	16
3.2 Popis cyklu	16
3.3 Základní rovnice	17
3.4 Postup výpočtu	17
4 Dieselův cyklus	20
4.1 Historie	20
4.2 Popis cyklu	20
4.3 Základní rovnice	21
4.4 Postup výpočtu	21
5 Sabatův cyklus	25
5.1 Historie	25
5.2 Popis cyklu	25
5.3 Základní rovnice	26
5.4 Postup výpočtu	27
6 Carnotův cyklus	33
6.1 Historie	33
6.2 Popis cyklu	33
6.3 Základní rovnice	34
6.4 Postup výpočtu	34
7 Stirlingův cyklus	37
7.1 Historie	37
7.2 Popis cyklu	37
7.3 Základní rovnice	38
7.4 Postup výpočtu	39
8 Závěr	42
9 Seznam použitých zdrojů	43
10 Seznam použitých zkratk a symbolů	44

1 Úvod

Předkem dnešních spalovacích motorů je Ottův motor, konstruovaný v roce 1876, a Dieselův motor, patentovaný v roce 1897. Spalovací motor je tedy tepelný zdroj, který mění tepelnou energii na mechanickou práci. K porozumění jeho funkce musíme znát základy termomechaniky. [1]

Pro zjednodušení a vzhledem k získaným znalostem během bakalářského studia budou uvažovány ideální cykly sestávající z vratných změn. Východiskem tedy bude ideální plyn a tepelné cykly bez tření, bez turbulentního proudění a bez nežádoucích tepelných ztrát. Všechny cykly se skládají ze základních termodynamických dějů: izochorický, izobarický, izotermický a adiabatický.

Izochorický děj probíhá při konstantním objemu. [2]

$$V_1 = V_2 \quad (1.1)$$

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (1.2)$$

Izobarický děj probíhá při konstantním tlaku [2]

$$p_1 = p_2 \quad (1.3)$$

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (1.4)$$

Izotermický děj probíhá při konstantní teplotě [2]

$$T_1 = T_2 \quad (1.5)$$

$$p_1 * V_1 = p_2 * V_2 \quad (1.6)$$

Adiabatický děj probíhá bez výměny tepla s okolím [2]

$$Q_{12} = 0 \quad (1.7)$$

$$s_{12} = 0 \quad (1.8)$$

$$p_1 * V_1^\kappa = p_2 * V_2^\kappa \quad (1.9)$$

2 Vstupní parametry

Podle domluvy s vedoucím byl zvolen počáteční tlak $p_1=100$ kPa (což odpovídá cca atmosférickému tlaku) a počáteční teplota $T_1=303$ K. Teplota T_1 je jen o něco vyšší než teplota okolí (což byla uvažována za 20 °C). To za předpokladu, že se vzduch při nasávání mírně ohřeje. Do každého cyklu bude dodán celkově 3000 J tepla.

Vstupní parametry jsou uváděny v tabulce 2.1. [2]

Tabulka 2.1 Vstupní parametry

Název	Označení	Hodnota [jednotka]
Počáteční tlak	p_1	100 000 [Pa]
Počáteční/minimální teplota	T_1/T_C	303 [K]
Měrná plynová konstanta	r	287 [J*kg ⁻¹ *K ⁻¹]
Měrná tepelná kapacita při V=konst	c_v	720 [J*kg ⁻¹ *K ⁻¹]
Měrná tepelná kapacita při p=konst	c_p	1010 [J*kg ⁻¹ *K ⁻¹]
Celkové dodané teplo	Q_H	3000 [J]

Dále pro Ottova, Dieselova a Sabateova cyklu byl zvolen kompresní poměr $\varepsilon=10$ a zdvihový objem $V_Z=1600$ cm³.

Z rovnice kompresního poměru (2.1) lze vyjádřit rovnici kompresního objemu (2.2). [2]

$$\varepsilon = \frac{V_Z + V_K}{V_K} \quad (2.1)$$

$$V_K = \frac{V_Z}{\varepsilon - 1} \quad (2.2)$$

Pro Carnotova cyklu byl zvolen maximální teplota $T_H=1000$ K a objem $V_1=1800$ cm³.

Pro Stirlingova cyklu byl zvolen maximální teplota $T_H=1000$ K.

Z rovnici (2.3) lze vypočítat entropie v bodě 1, za předpokladu, že $p_0=100$ 000 Pa, a teplota T_0 se blíží k nule, potom i teplota se blíží k nule a $S_0=0$ J*K⁻¹.

$$S_1 = S_0 + c_v * \ln\left(\frac{T_1}{T_0}\right) + r * \ln\left(\frac{V_1}{V_0}\right) \quad (2.3)$$

Výpočty a vykreslení grafů budou prováděny pomocí programu Matlab a vytvořen v něm program.

3 Ottův cyklus

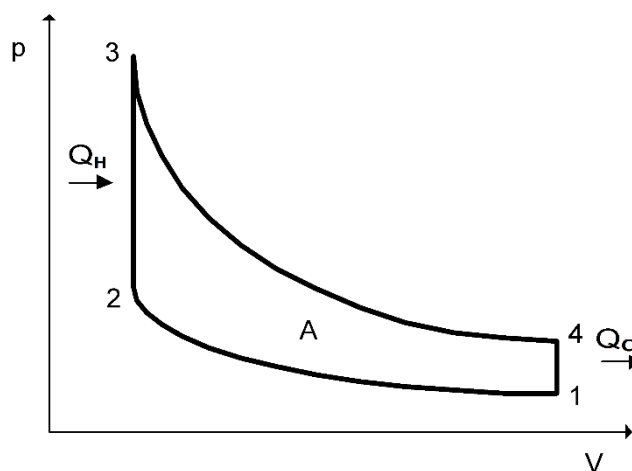
3.1 Historie

„Nicolaus Otto byl německý strojař, konstruktér a vynálezce Ottova motoru. Už v roce 1860 začal provádět první pokusy se spalovacími motory, jejichž dokumentaci si koupil a které jako první vyráběl francouzský technik Étienne Lenoir. V roce 1876 vyrobil Otto čtyřtákní motor se zvýšeným kompresním poměrem a 25. května 1877 si jej nechal patentovat. Tento typ motoru se stal základem pro stavbu pozdějších spalovacích motorů. Zážehový motor tohoto principu je dodnes označován jako „Ottův motor“.“ [3]

3.2 Popis cyklu

Ottův cyklus se používá u zážehových spalovacích motorů, jako jejich teoretický cyklus. Jako palivo motorů těchto typů se běžně používá benzín a ve spalovacím prostoru se spaluje směs vzduchu a paliva pomocí svíčky. Je to ideální tepelný oběh, při kterém jak přívod tepla (hoření spalín), tak odvod tepla (vyfukování) probíhá při stálém objemu- velmi rychle. Skládá se ze 2 izochor a ze 2 adiabat: adiabatická komprese, izochorický přívod tepla, adiabatická expanze a izochorický odvod tepla. [2]

Jeho účinnost teoreticky závisí jenom na kompresním poměru, se zvyšujícím kompresním poměrem zvyšuje i účinnost. Vzhledem k tomu, že stlačuje směs paliva a plynu, je omezen, aby nedocházelo k samovznícení. [2]



Obrázek 3.5 Ottův cyklus v p-V diagramu [3]

1-2 adiabatická komprese – směs se stlačuje

2-3 izochorický přívod tepla – hoření směsi

3-4 adiabatická expanze

4-1 izochorický odvod tepla – výfuk

3.3 Základní rovnice

Do Ottova cyklu se teplo přivádí za konstantního objemu, takže při izochorickém ději 2-3 [2]

$$Q_H = c_V * m * (T_3 - T_2) \quad (3.1)$$

Odvod tepla se také uskutečňuje za konstantního objemu, při izochorickém ději 4-1 [2]

$$Q_C = c_V * m * (T_1 - T_4) \quad (3.2)$$

Práce je rovna rozdílu tepla přivedeného a absolutní hodnoty tepla odvedeného [2]

$$A = Q_H - |Q_C| \quad (3.3)$$

Termickou účinnost Ottova cyklu dostaneme po dosažení vztahů (2.3), (2.2), (2.1) do rovnice (2.4) a po následném zjednodušení obdržíme finální vztah. [2]

$$\eta = \frac{A}{Q_H} = \frac{Q_H - |Q_C|}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_C|}{Q_H} = 1 - \frac{|c_V * m * (T_1 - T_4)|}{c_V * m * (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{|T_1 - T_4|}{T_3 - T_2} \quad (3.4)$$

Použitím rovnice kompresního poměru (2.5), dosažením a dalšími úpravami lze odvodit vztah pro účinnost, ze kterého je patrné, že termická účinnost je závislá pouze na kompresním poměru a Poissonově konstantě. [2]

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_4}{V_3} \quad (3.5)$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \quad (3.6)$$

3.4 Postup výpočtu

Objemy lze vypočítat z rovnic (3.7) a (3.8)

$$V_1 = V_4 = V_Z + V_K \quad (3.7)$$

$$V_2 = V_3 = V_K \quad (3.8)$$

Z adiabatického děje 1-2 lze vyjádřit tlak p_2

$$p_2 = p_1 * \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa} \quad (3.9)$$

Teplotu T_2 lze získat taky z adiabatického děje 1-2

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1} \quad (3.10)$$

Teplotu T_3 lze vyjádřit z rovnici (2.1) pro výpočet přivedeného tepla Q_H

$$T_3 = \frac{Q_H}{m * c_V} + T_2 \quad (3.11)$$

Pomocí Charlesova zákona lze vypočítat tlak p_3

$$p_3 = \frac{p_2 * T_3}{T_2} \quad (3.12)$$

Z adiabatického děje 3-4 lze získat tlak p_4

$$p_4 = p_3 * \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^\kappa \quad (3.13)$$

Teplotu T_4 lze vyjádřit taky z adiabatického děje 3-4

$$T_4 = T_3 * \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{\kappa-1} \quad (3.14)$$

Odvedené teplo lze pomocí vypočtených hodnot vypočítat z rovnice (3.2)

Účinnost lze vypočítat z rovnice (3.4)

Entropii lze vypočítat z rovnic (2.3), (3.15), (3.16), (3.17)

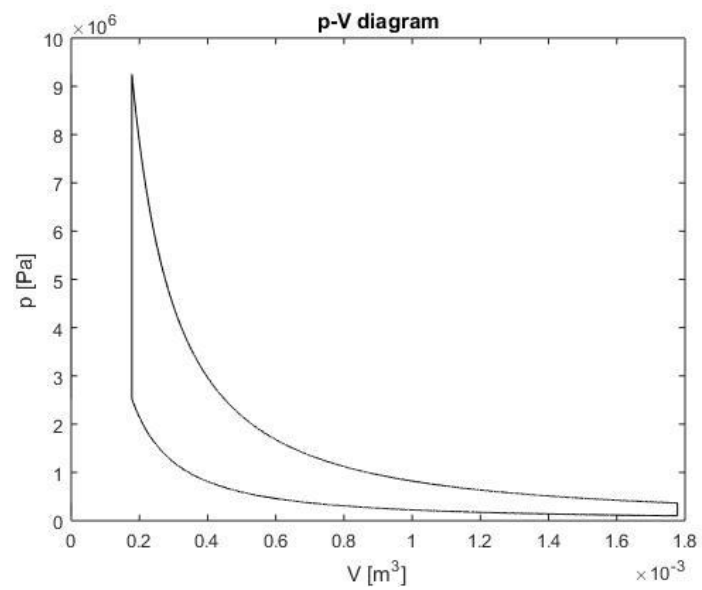
$$S_2 = S_1 + c_V * \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + r * \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (3.15)$$

$$S_3 = S_2 + c_V * \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right) + r * \ln\left(\frac{V_3}{V_2}\right) \quad (3.16)$$

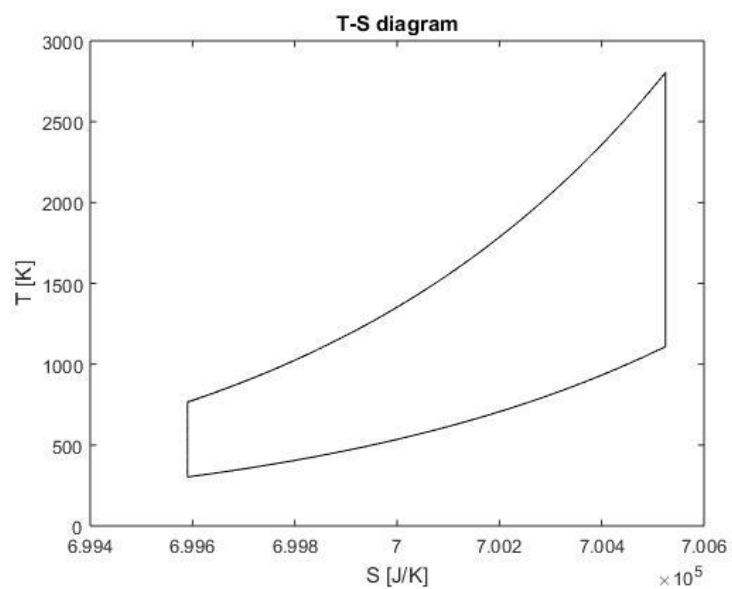
$$S_4 = S_3 + c_V * \ln\left(\frac{T_4}{T_3}\right) + r * \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (3.17)$$

Tabulka 3.1 Vypočtené parametry Ottova cyklu

Veličina	Hodnota [jednotka]	Veličina	Hodnota [jednotka]
p_1	100 000 [Pa]	V_1	0,001778 [m ³]
p_2	2 511 886 [Pa]	V_2	0,000178 [m ³]
p_3	9 238 449 [Pa]	V_3	0,000178 [m ³]
p_4	367 789 [Pa]	V_4	0,001778 [m ³]
T_1	303 [K]	s_1	699 590 [J*K ⁻¹]
T_2	761 [K]	s_2	699 590 [J*K ⁻¹]
T_3	2 799 [K]	s_3	700 530 [J*K ⁻¹]
T_4	1 114 [K]	s_4	700 530 [J*K ⁻¹]
η	0,6018 [%]	Q_C	-1 194 [J]



Obrázek 3.2 Vykreslený p - V diagram Ottova cyklu



Obrázek 3.3 Vykreslený T - S diagram Ottova cyklu

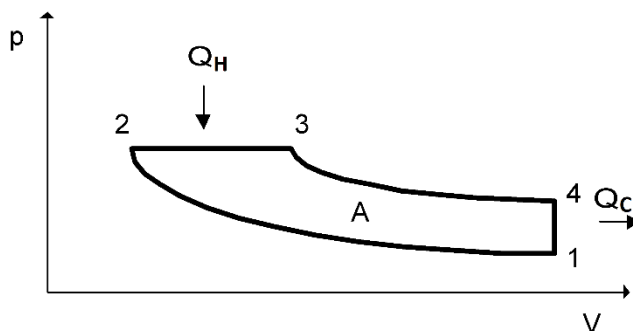
4 Dieselův cyklus

4.1 Historie

„Rudolf Diesel byl německý vynálezce, známý především díky svému motoru. Jako velmi schopný student byl představen Carl von Lindemu, inženýrovi, který se specializoval na projektování a produkci chladicích zařízení. V roce 1880 začal pracovat v Lindeho pařížské firmě. Jeho úkolem bylo teoretické zdokonalení spalovacího motoru při využití Carnotova cyklu. V dalším období pracoval na vylepšení spalovacího motoru. Výsledkem byl patent, který obdržel v roce 1892, v následujícím roce vydal pak tiskem práci „Teorie a konstrukce ekonomického spalovacího motoru“, vysvětlující podstatu jeho myšlenky. V roce 1897 zkonstruoval vysokotlaký spalovací pístový motor se samočinným zážehem, vyvolaným stlačením vzduchu do 3,5 Mpa. Byl to jeho největší úspěch. Tento typ vysokotlakého motoru, od té chvíle nazývaný Dieselův motor nebo jednoduše diesel, pracoval na tekuté těžké palivo (hnací olej). K zážehu paliva docházelo po jeho vytrysknutí do spalovací komory od zahřátého vzduchu v důsledku stlačení. V tomtéž roce se mu podařilo motor vylepšit tak, aby využíval tepelnou energii na 26 %, tedy dvakrát účinněji než v té době nejlepší parní stroj.“ [4]

4.2 Popis cyklu

Dieselův cyklus se používá u vznětových spalovacích motorů, jako jejich teoretický cyklus. Jako palivo motorů těchto typů je obvykle nafta. Nejprve nasává vzduch do spalovacího prostoru, potom je stlačen na vysoký tlak, díky čemuž se ohřeje na vysokou teplotu. Do spalovacího prostoru tryskou vstříkané palivo se vznítí díky vysoké teplotě. Je to ideální tepelný oběh, při kterém přívod tepla (hoření spalín) probíhá při stálém tlaku a odvod tepla (vyfukování) při konstantním objemu. Skládá se ze 2 adiabat, 1 izochor a 1 izobar: adiabatická komprese, izobarický přívod tepla, adiabatická expanze a izochorický odvod tepla. [2]



Obrázek 4.1 Dieselův cyklus v p - V diagramu [4]

1-2 adiabatická komprese – směs se stlačuje

2-3 izobarický přívod tepla – hoření směsi

3-4 adiabatická expanze

4-1 izochorický odvod tepla – výfuk

4.3 Základní rovnice

Do Dieselova cyklu se teplo přivádí za konstantního tlaku, takže při izobarickém ději 2-3 [2]

$$Q_H = c_p * m * (T_3 - T_2) \quad (4.1)$$

Odvod tepla se uskutečňuje za konstantního objemu, při izochorickém ději 4-1 [2]

$$Q_C = c_v * m * (T_1 - T_4) \quad (4.2)$$

Práce je rovna rozdílu tepla přivedeného a absolutní hodnoty tepla odvedeného [2]

$$A = Q_H - |Q_C| \quad (4.3)$$

Termickou účinnost Dieselova cyklu dostaneme po dosažení vztahů (3.3), (3.2), (3.1) do rovnice (3.4) a po následném zjednodušení obdržíme finální vztah. [2]

$$\eta = \frac{A}{Q_H} = \frac{Q_H - |Q_C|}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_C|}{Q_H} = 1 - \frac{|c_v * m * (T_1 - T_4)|}{c_p * m * (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{|T_1 - T_4|}{\kappa * (T_3 - T_2)} \quad (4.4)$$

Použitím rovnice kompresního poměru (3.5) a stupně plnění (3.6), dosažením a dalšími úpravami lze odvodit vztah pro účinnost, ze kterého je patrné, že termická účinnost je závislá pouze na kompresním poměru a Poissonově konstantě. [2]

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \quad (4.5)$$

$$\varphi = \frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_2} \quad (4.6)$$

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\kappa * \varepsilon^{\kappa-1}} * \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\varphi - 1} \quad (4.7)$$

4.4 Postup výpočtu

Objemy V_1 a V_4 lze vypočítat z rovnice (4.8) a objem V_2 z rovnice (4.9)

$$V_1 = V_4 = V_Z + V_K \quad (4.8)$$

$$V_2 = V_K \quad (4.9)$$

Z adiabatického děje 1-2 lze vyjádřit tlak p_2

$$p_2 = p_1 * \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa} \quad (4.10)$$

Teplotu T_2 lze získat taky z adiabatického děje 1-2

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1} \quad (4.11)$$

Teplotu T_3 lze vyjádřit z rovnici (3.1) pro výpočet přivedeného tepla Q_H

$$T_3 = \frac{Q_H}{m * c_V} + T_2 \quad (4.12)$$

Děj 2-3 je izobarický, takže tlak p_3 je stejný jako tlak p_2

$$p_3 = p_2 \quad (4.13)$$

Objem V_3 lze vypočítat z izobarického děje 2-3

$$V_3 = V_2 * \frac{T_3}{T_2} \quad (4.14)$$

Z adiabatického děje 3-4 lze získat tlak p_4

$$p_4 = p_3 * \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^\kappa \quad (4.15)$$

Teplotu T_4 lze vyjádřit taky z adiabatického děje 3-4

$$T_4 = T_3 * \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{\kappa-1} \quad (4.16)$$

Odvedené teplo lze pomocí vypočtených hodnot vypočítat z rovnice (4.2)

Účinnost lze vypočítat z rovnice (4.4)

Entropii lze vypočítat z rovnic (2.3), (4.17), (4.18), (4.19)

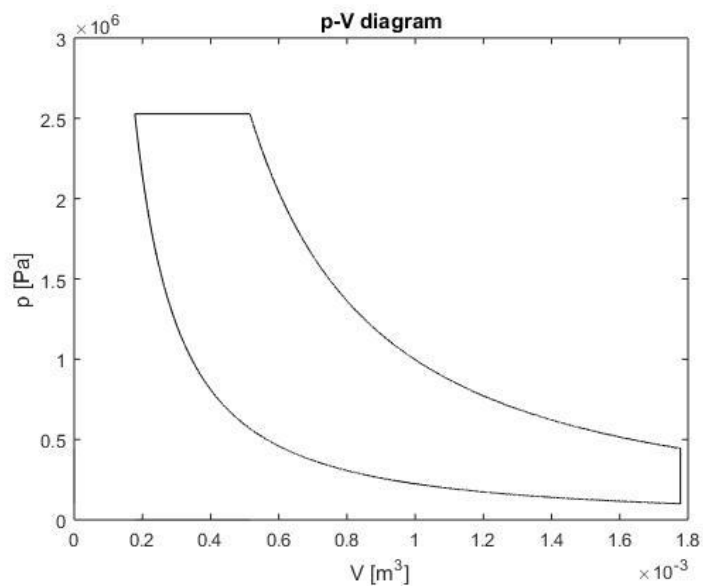
$$S_2 = S_1 + c_V * \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + r * \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (4.17)$$

$$S_3 = S_2 + c_V * \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right) + r * \ln\left(\frac{V_3}{V_2}\right) \quad (4.18)$$

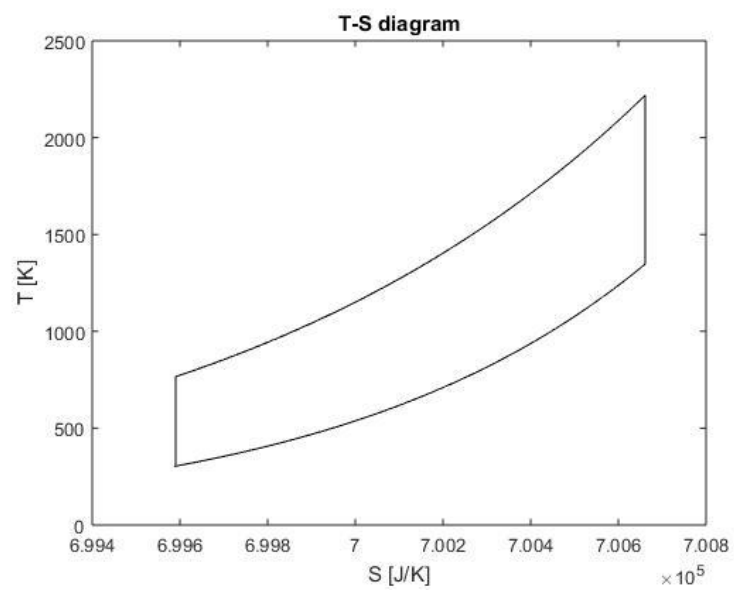
$$S_4 = S_3 + c_V * \ln\left(\frac{T_4}{T_3}\right) + r * \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (4.19)$$

Tabulka 4.1 Vypočtené parametry Dieselova cyklu

Veličina	Hodnota [jednotka]	Veličina	Hodnota [jednotka]
p_1	100 000 [Pa]	V_1	0,001778 [m ³]
p_2	2 511 886 [Pa]	V_2	0,000178 [m ³]
p_3	2 511 886 [Pa]	V_3	0,000517 [m ³]
p_4	445 902 [Pa]	V_4	0,001778 [m ³]
T_1	303 [K]	s_1	699 590 [J*K ⁻¹]
T_2	761 [K]	s_2	699 590 [J*K ⁻¹]
T_3	2 214 [K]	s_3	700 660 [J*K ⁻¹]
T_4	1 351 [K]	s_4	700 660 [J*K ⁻¹]
η	0,4857 [%]	Q_C	-1 542,7 [J]



Obrázek 4.2 Vykreslený p-V diagram Dieselova cyklu



Obrázek 4.3 Vykreslený T - S diagram Diesellova cyklu

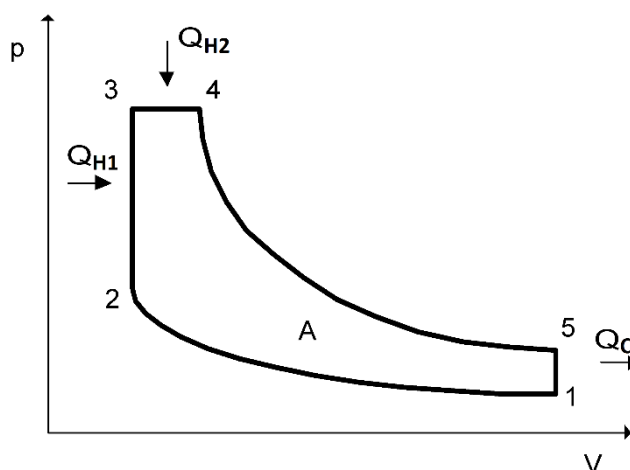
5 Sabateův cyklus

5.1 Historie

Dnešní operační podmínky Dieselova motoru se značně liší od těch, které jsou uváděny v ideální Ottova a Dieselova cyklu. U Dieselových motorů v dnešní době ke spalování dochází jednak za konstantního objemu, jednak za konstantního tlaku a proto i název smíšený cyklus, nebo Sabateův cyklus podle francouzského konstruktéra. [5]

5.2 Popis cyklu

Sabateův cyklus je oběh lépe modelující vznětové spalovací motory než Dieselův cyklus. Princip je obdobný jak u Dieselova cyklu, do spalovacího prostoru vstříkané palivo (nafta) se vznítí díky vysoké teplotě stlačeného vzduchu. Na rozdíl u tohoto cyklu přívod tepla (hoření spalín) probíhá jak při stálém objemu, tak při stálém tlaku a odvod tepla (vyfukování) při stálém objemu. Skládá se ze 2 adiabát, ze 2 izochor a z 1 izobar: adiabatická komprese, izochorický přívod tepla, izobarický přívod tepla, adiabatická expanze a izochorický odvod tepla. [2]



Obrázek 5.1 Sabateův cyklus v p - V diagramu [6]

1-2 adiabatická komprese – směs se stlačuje

2-3 izochorický přívod tepla – hoření směsi

3-4 izobarický přívod tepla – hoření směsi

4-5 adiabatická expanze

5-1 izochorický odvod tepla – výfuk

5.3 Základní rovnice

Do Sabateova cyklu se část tepla přivádí za konstantního objemu, takže při izochorickém ději 2-3 [2]

$$Q_{H1} = c_V * m * (T_3 - T_2) \quad (5.1)$$

Zbývající část tepla přivádí za konstantního tlaku, takže při izobarickém ději 3-4 [2]

$$Q_{H2} = c_p * m * (T_4 - T_3) \quad (5.2)$$

Odvod tepla se taktéž uskutečňuje za konstantního objemu, při izochorickém ději 5-1 [2]

$$Q_C = c_V * m * (T_1 - T_5) \quad (5.3)$$

Práce je rovna rozdílu tepla přivedeného a absolutní hodnoty tepla odvedeného [2]

$$A = (Q_{H1} + Q_{H2}) - |Q_C| = Q_H - |Q_C| \quad (5.4)$$

Termickou účinnost Sabateho cyklu dostaneme po dosažení vztahů (5.3), (5.2), (5.1) do rovnice (2.4) a po následném zjednodušení obdržíme finální vztah. [2]

$$\eta = \frac{A}{Q_H} = \frac{Q_H - |Q_C|}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_C|}{Q_H} = 1 - \frac{|c_V * m * (T_1 - T_4)|}{c_V * m * (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{|T_1 - T_4|}{T_3 - T_2} \quad (5.5)$$

Použitím rovnice kompresního poměru (5.6), stupně plnění (5.7), stupně zvýšení tlaku (5.8), dosažením a dalšími úpravami lze odvodit vztah pro účinnost, z kterého je patrné, že termická účinnost je závislá pouze na kompresním poměru, stupni plnění, stupni zvýšení tlaku a Poissonově konstantě. [2]

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \quad (5.6)$$

$$\varphi = \frac{V_4}{V_3} \quad (5.7)$$

$$\psi = \frac{p_3}{p_2} \quad (5.8)$$

$$\eta = 1 - \frac{\psi * \varphi^\kappa - 1}{\varepsilon^{\kappa-1} * [(\psi - 1) + \kappa * \psi * (\varphi - 1)]} \quad (5.9)$$

5.4 Postup výpočtu

Výpočty budou udělány ve 3 variantech, kde poměr tepla dodaného za konstantního objemu a za konstantního tlaku je $Q_{H1}:Q_{H2}=1:3$, $Q_{H1}:Q_{H2}=1:1$ a $Q_{H1}:Q_{H2}=3:1$.

Objemy V_1 a V_5 lze vypočítat z rovnice (5.10) a objemy V_2 a V_3 z rovnice (5.11)

$$V_1 = V_5 = V_Z + V_K \quad (5.10)$$

$$V_2 = V_3 = V_K \quad (5.11)$$

Z adiabatického děje 1-2 lze vyjádřit tlak p_2

$$p_2 = p_1 * \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\kappa \quad (5.12)$$

Teplotu T_2 lze získat taky z adiabatického děje 1-2

$$T_2 = T_1 * \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1} \quad (5.13)$$

Teplotu T_3 lze vyjádřit z rovnici (5.1) pro výpočet přivedeného tepla Q_{H1}

$$T_3 = \frac{Q_{H1}}{m * c_V} + T_2 \quad (5.14)$$

Pomocí Charlesova zákona lze vypočítat tlak p_3

$$p_3 = \frac{p_2 * T_3}{T_2} \quad (5.15)$$

Teplotu T_4 lze vyjádřit z rovnici (5.2) pro výpočet přivedeného tepla Q_{H2}

$$T_4 = \frac{Q_{H2}}{m * c_V} + T_3 \quad (5.16)$$

Děj 3-4 je izobarický, takže tlak p_4 je stejný jako tlak p_3

$$p_4 = p_3 \quad (5.17)$$

Objem V_4 lze vypočítat z izobarického děje 3-4

$$V_4 = V_3 * \frac{T_4}{T_3} \quad (5.18)$$

Z adiabatického děje 4-5 lze získat tlak p_5

$$p_5 = p_4 * \left(\frac{V_4}{V_5}\right)^\kappa \quad (5.19)$$

Teplotu T_5 lze vyjádřit taky z adiabatického děje 4-5

$$T_5 = T_4 * \left(\frac{V_4}{V_5}\right)^{\kappa-1} \quad (5.20)$$

Odvedené teplo pomocí vypočtených hodnot lze vypočítat z rovnice (5.3)

Účinnost lze vypočítat z rovnice (5.5)

Entropii lze vypočítat z rovnic (2.3), (5.21), (5.22), (5.23), (5.24)

$$S_2 = S_1 + c_V * \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + r * \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (5.21)$$

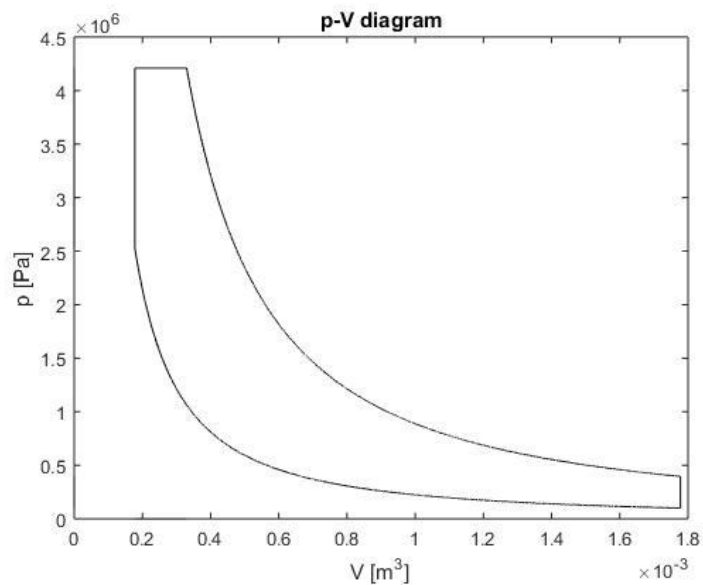
$$S_3 = S_2 + c_V * \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right) + r * \ln\left(\frac{V_3}{V_2}\right) \quad (5.22)$$

$$S_4 = S_3 + c_V * \ln\left(\frac{T_4}{T_3}\right) + r * \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (5.23)$$

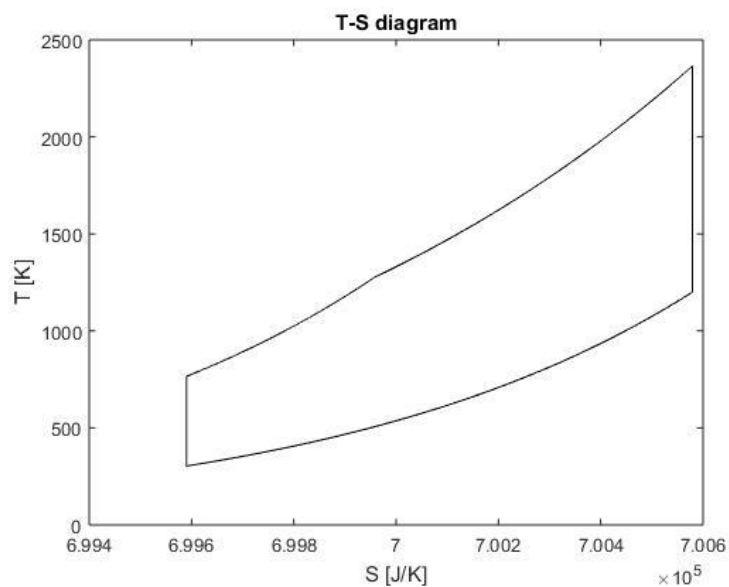
$$S_5 = S_4 + c_V * \ln\left(\frac{T_5}{T_4}\right) + r * \ln\left(\frac{V_5}{V_4}\right) \quad (5.24)$$

Tabulka 5.1 Vypočtené parametry Sabateova cyklu pro $Q_{H1}=750J$, $Q_{H2}=2250J$

Veličina	Hodnota [jednotka]	Veličina	Hodnota [jednotka]
p_1	100 000 [Pa]	V_1	0,001778 [m ³]
p_2	2 511 886 [Pa]	V_2	0,000178 [m ³]
p_3	4 193 527 [Pa]	V_3	0,000178 [m ³]
p_4	4 193 527 [Pa]	V_4	0,000330 [m ³]
p_5	397 295 [Pa]	V_5	0,001778 [m ³]
T_1	303 [K]	s_1	699 590 [J*K ⁻¹]
T_2	761 [K]	s_2	699 590 [J*K ⁻¹]
T_3	1 271 [K]	s_3	699 960 [J*K ⁻¹]
T_4	2 360 [K]	s_4	700 580 [J*K ⁻¹]
T_5	1 204 [K]	s_5	700 580 [J*K ⁻¹]
η	0,5580	Q_C	-1 326 [J]



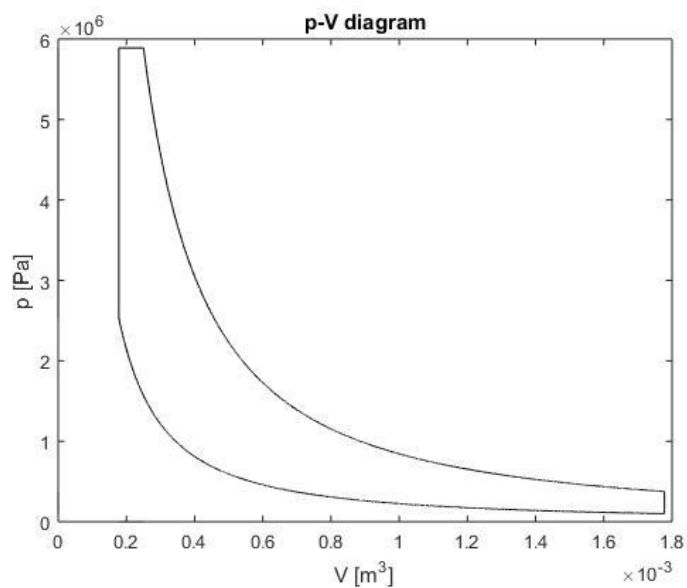
Obrázek 5.2 Vykreslený p - V diagram Sabateova cyklu pro $Q_{H1}=750J$, $Q_{H2}=2250J$



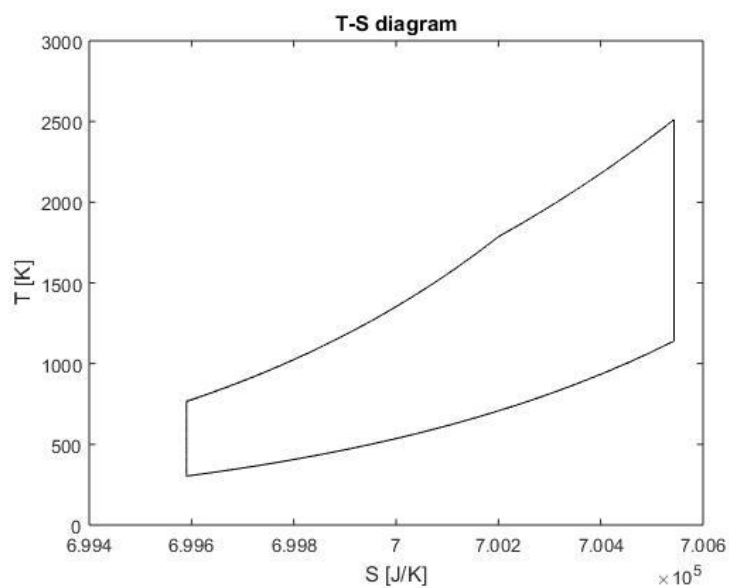
Obrázek 5.3 Vykreslený T - S diagram Sabateova cyklu pro $Q_{H1}=750J$, $Q_{H2}=2250J$

Tabulka 5.2 Vypočtené parametry Sabateova cyklu pro $Q_{H1}=1500J$, $Q_{H2}=1500J$

Veličina	Hodnota [jednotka]	Veličina	Hodnota [jednotka]
p_1	100 000 [Pa]	V_1	0,001778 [m ³]
p_2	2 511 886 [Pa]	V_2	0,000178 [m ³]
p_3	5 875 168 [Pa]	V_3	0,000178 [m ³]
p_4	5 875 168 [Pa]	V_4	0,000330 [m ³]
p_5	377 661 [Pa]	V_5	0,001778 [m ³]
T_1	303 [K]	s_1	699 590 [J*K ⁻¹]
T_2	761 [K]	s_2	699 590 [J*K ⁻¹]
T_3	1 780 [K]	s_3	700 200 [J*K ⁻¹]
T_4	2 507 [K]	s_4	700 540 [J*K ⁻¹]
T_5	1 144 [K]	s_5	700 540 [J*K ⁻¹]
η	0,5872	Q_C	-1 238 [J]



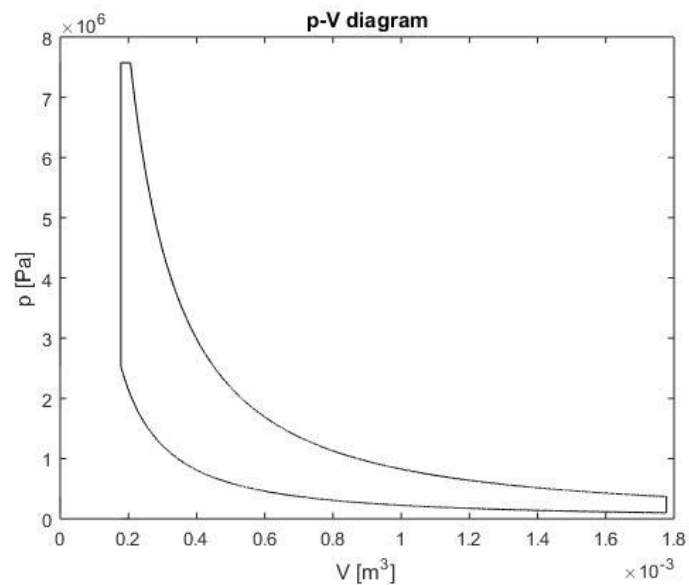
Obrázek 5.4 Vykreslený p-V diagram Sabateova cyklu pro $Q_{H1}=1500J$, $Q_{H2}=1500J$



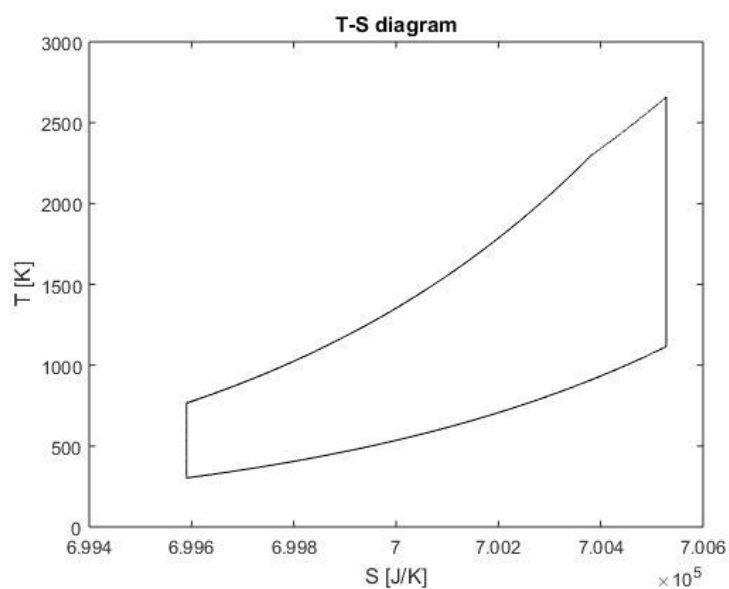
Obrázek 5.5 Vykreslený T-S diagram Sabateova cyklu pro $Q_{H1}=1500J$, $Q_{H2}=1500J$

Tabulka 5.3 Vypočtené parametry Sabateova cyklu pro $Q_{H1}=2250J$, $Q_{H2}=750J$

Veličina	Hodnota [jednotka]	Veličina	Hodnota [jednotka]
p_1	100 000 [Pa]	V_1	0,001778 [m ³]
p_2	2 511 886 [Pa]	V_2	0,000178 [m ³]
p_3	7 556 808 [Pa]	V_3	0,000178 [m ³]
p_4	7 556 808 [Pa]	V_4	0,000330 [m ³]
p_5	369 713 [Pa]	V_5	0,001778 [m ³]
T_1	303 [K]	s_1	699 590 [J*K ⁻¹]
T_2	761 [K]	s_2	699 590 [J*K ⁻¹]
T_3	2 290 [K]	s_3	700 380 [J*K ⁻¹]
T_4	2 653 [K]	s_4	700 530 [J*K ⁻¹]
T_5	1 120 [K]	s_5	700 530 [J*K ⁻¹]
η	0,5990	Q_C	-1 203 [J]



Obrázek 5.6 Vykreslený p-V diagram Sabateova cyklu pro $Q_{H1}=2250J$, $Q_{H2}=750J$



Obrázek 5.7 Vykreslený T-S diagram Sabateova cyklu pro $Q_{H1}=2250J$, $Q_{H2}=750J$

6 Carnotův cyklus

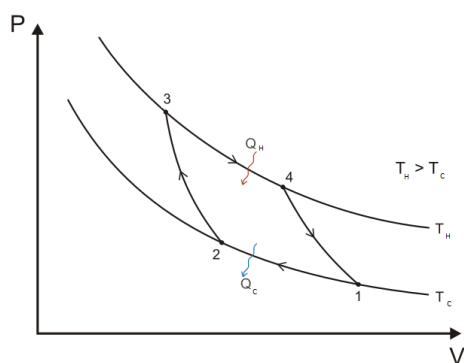
6.1 Historie

Sadi Carnot byl francouzský fyzik, matematik a inženýr, zakladatel termodynamiky. V roce 1824 publikoval dílo *Úvahy o hybné síle ohně*, ve kterém popsal cyklus stroje, kde probíhá ohřívání, expanze, ochlazení a opětné stlačení ideálního plynu, dnes známý jako Carnotův cyklus. Potom Émile Clapeyron vypracoval to přesněji v letech 1830 a 1840. Cyklus dává horní limitu pro účinnost, který žádný jiný klasický termodynamický cyklus nedokáže dosáhnout při přeměně tepla na práci, nebo naopak při ochlazení. Systém pracující podle Carnotova cyklu je nazýván Carnotův motor, ačkoli takový perfektní motor je teoretická konstrukce a nelze ho v reálné praxi konstruovat. [7] [8]

6.2 Popis cyklu

Carnotův cyklus je teoretickým tepelným cyklem pracujícím s nejvyšší účinností mezi dvěma teplotami. Žádný jiný tepelný cyklus nedokáže dosáhnout jeho účinnost. Pracuje se dvěma zásobníky tepla o stálých a navzájem různých teplotách. Skládá se ze 2 adiabat a ze 2 izoterm: izotermická expanze s přívodem tepla, adiabatická expanze, izotermická komprese s odvodem tepla a adiabatická komprese. [2]

Realizování tohoto cyklu vyžaduje několik předpokladů. Teplota chladnějšího zásobníku (T_C) nemůže být menší než teplota okolí. Teplota teplejšího zásobníku (T_H) nemůže být příliš vysoká, jinak materiál to nevydržel. Mezi těmito teplotami bude účinnost Carnotova cyklu výrazně menší než 1. Účinnost reálných tepelných motorů je menší než účinnost jich nahrazujících teoretických tepelných cyklů, které i tak mají menší účinnost než Carnotův cyklus pracující mezi stejnými teplotami. Takový Carnotův cyklus nelze realizovat, protože největší teplota je příliš vysoká. [2]



Obrázek 6.1 Carnotův cyklus v p-V diagramu [9]

- 1-2 izotermický odvod tepla
- 2-3 adiabatická komprese
- 3-4 izotermický přívod tepla
- 4-1 adiabatická expanze

6.3 Základní rovnice

Do Carnotova cyklu se teplo přivádí za konstantní teploty, takže při izotermickém ději 3-4 [2]

$$Q_H = m * r * T_H * \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (6.1)$$

Odvod tepla se také uskutečňuje za konstantní teploty, při izotermickém ději 1-2 [2]

$$Q_C = m * r * T_C * \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (6.2)$$

Práce je rovna rozdílu tepla přivedeného a absolutní hodnoty tepla odvedeného [2]

$$A = Q_H - |Q_C| \quad (6.3)$$

Termickou účinnost Carnotova cyklu dostaneme po dosažení vztahů (6.3), (6.2), (6.1) do rovnice (2.4) a následným zjednodušením obdržíme finální vztah. [2]

$$\eta = \frac{A}{Q_H} = \frac{Q_H - |Q_C|}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_C|}{Q_H} = 1 - \frac{|m * r * T_C * \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)|}{m * r * T_H * \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)} = 1 - \frac{|T_C * \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)|}{T_H * \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)} \quad (6.4)$$

Z porovnání rovnic adiabat 2-3 a 4-1 je zřejmé, že poměr objemů v rovnici (6.4) jsou stejné. Takže dosažením a dalšími úpravami lze odvodit vztah pro účinnost, z kterého je patrné, že termická účinnost je závislá pouze na teplotách, mezi kterými se cyklus pracuje. [2]

$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (6.5)$$

6.4 Postup výpočtu

$$V_1 = V_Z + V_K \quad (6.6)$$

Z adiabatického děje 4-1 lze vyjádřit objem V_4

$$V_4 = V_1 * \left(\frac{T_1}{T_4}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \quad (6.7)$$

Tlak p_4 lze získat taky z adiabatického děje 4-1

$$p_4 = p_1 * \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa} \quad (6.8)$$

Objem V_3 lze vyjádřit z rovnici (2.1) pro výpočet přivedeného tepla Q_H

$$V_3 = \frac{V_4}{\exp\left(\frac{Q_H}{m * r * T_3}\right)} \quad (6.9)$$

Pomocí Boyle-Mariotteova zákona lze vypočítat tlak p_3

$$p_3 = p_4 * \frac{V_4}{V_3} \quad (6.10)$$

Z adiabatického děje 2-3 lze získat objem V_2

$$V_2 = V_3 * \left(\frac{T_3}{T_2}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}} \quad (6.11)$$

Tlak p_2 lze vyjádřit z izotermického děje 1-2

$$p_2 = p_1 * \frac{V_1}{V_2} \quad (6.12)$$

Odvedené teplo pomocí vypočtených hodnot lze vypočítat z rovnice (6.2)

Účinnost lze vypočítat z rovnice (6.6)

Entropii lze vypočítat z rovnic (2.3), (6.13), (6.14), (6.15)

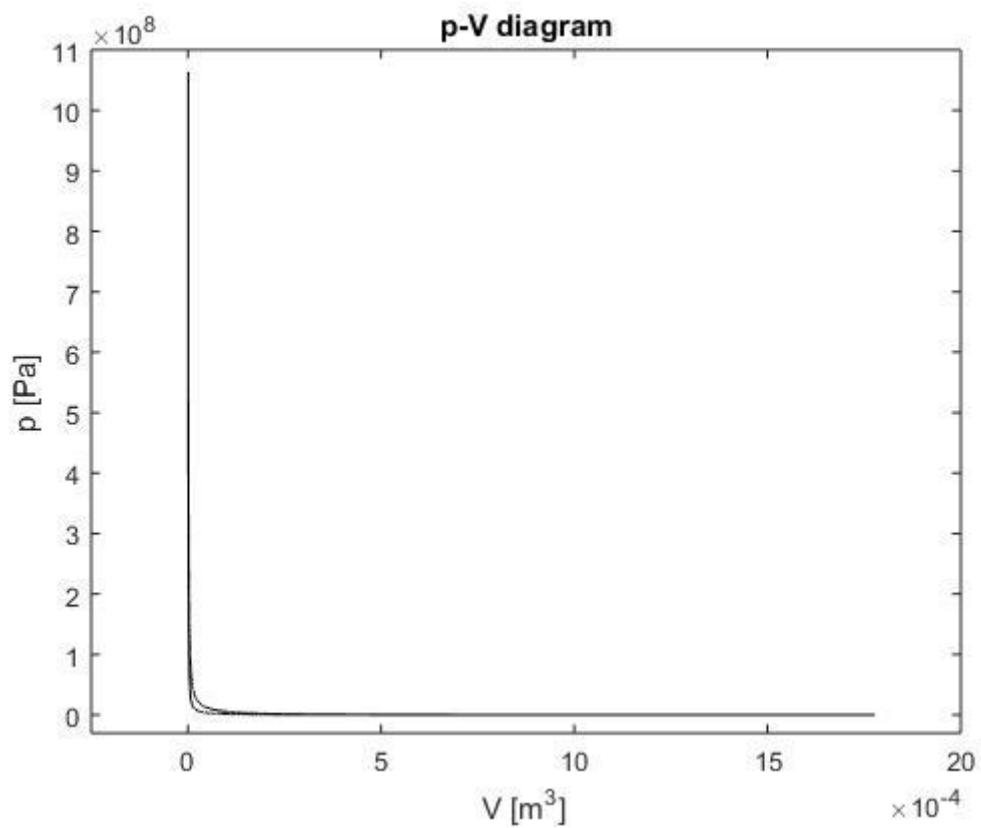
$$S_2 = S_1 + c_V * \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + r * \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (6.13)$$

$$S_3 = S_2 + c_V * \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right) + r * \ln\left(\frac{V_3}{V_2}\right) \quad (6.14)$$

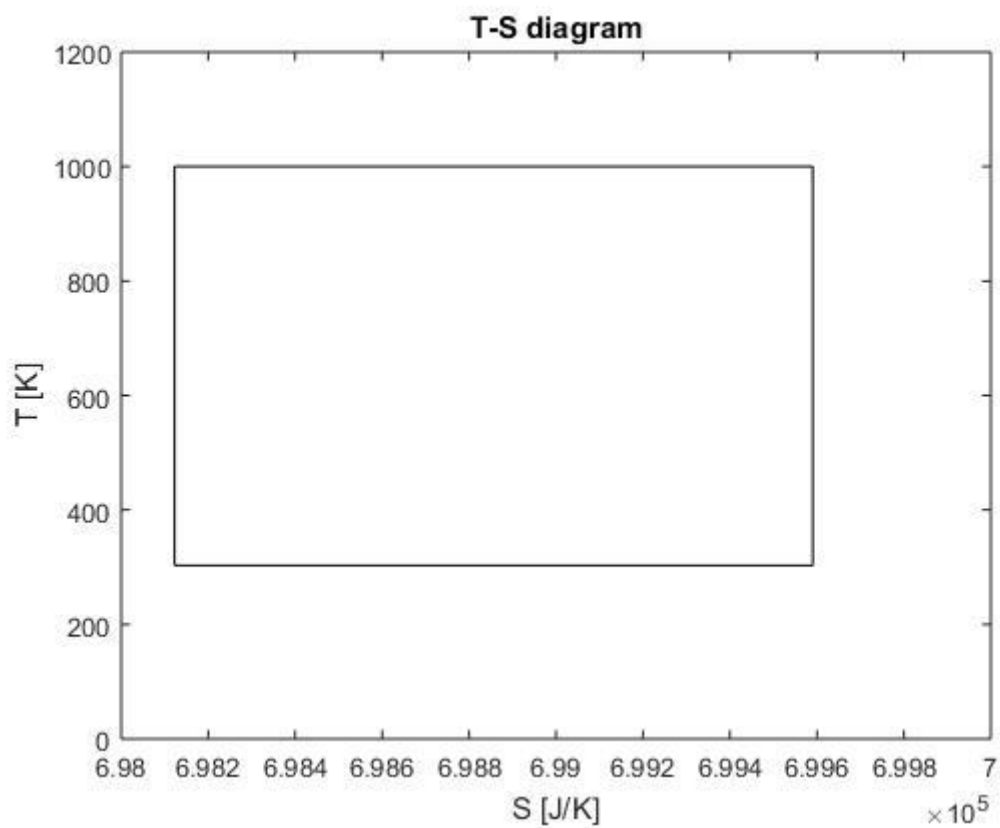
$$S_4 = S_3 + c_V * \ln\left(\frac{T_4}{T_3}\right) + r * \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (6.15)$$

Tabulka 6.1 Vypočtené parametry Carnotova cyklu

Veličina	Hodnota [jednotka]	Veličina	Hodnota [jednotka]
p_1	100 000 [Pa]	V_1	0,0018 [m ³]
p_2	16 619 000 [Pa]	V_2	1,0697*10 ⁻⁵ [m ³]
p_3	1 063 200 000 [Pa]	V_3	5,5185*10 ⁻⁷ [m ³]
p_4	6 397 500 [Pa]	V_4	9,1712*10 ⁻⁵ [m ³]
T_1	303 [K]	s_1	699 590 [J*K ⁻¹]
T_2	303 [K]	s_2	698 120 [J*K ⁻¹]
T_3	1 000 [K]	s_3	698 120 [J*K ⁻¹]
T_4	1 000 [K]	s_4	699 590 [J*K ⁻¹]
η	0,697 [%]	Q_C	-909 [J]



Obrázek 6.2 Vykreslený p-V diagram Carnotova cyklu



Obrázek 6.3 Vykreslený T-S diagram Carnotova cyklu

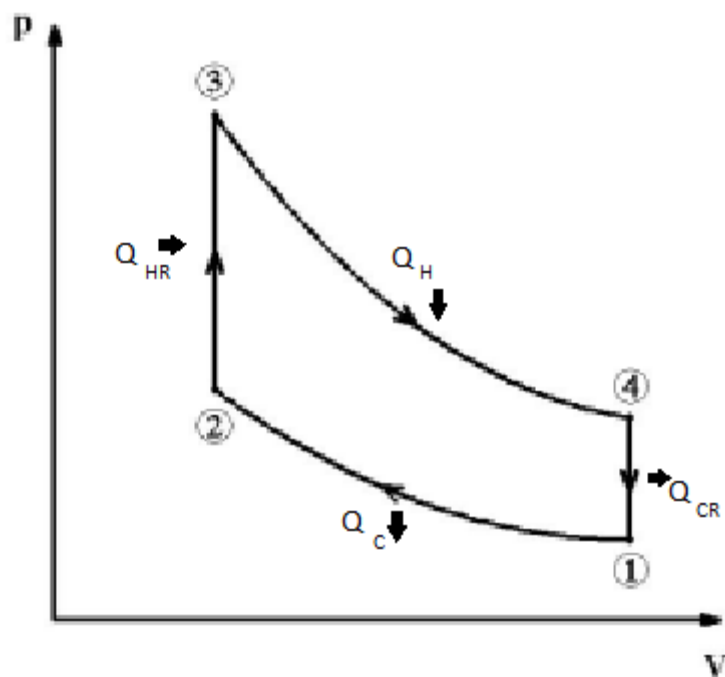
7 Stirlingův cyklus

7.1 Historie

Robert Stirling byl skotský duchovní, který vynalezl Stirlingův cyklus a v roce 1816 dal patentovat regenerátor. Na strojích udělal značné inovace, pomáhal bratrovi Jamesovi ho dál vypracovat. V roce 1818 podařilo se mu konstruovat první praktickou verzi jeho motoru. Jejich cílem byl vypracovat tepelný stroj, který je bezpečnější než tehdejší parní stroje. [10]

7.2 Popis cyklu

Stirlingův motor je uzavřený motor s vnějším spalováním. Oproti spalovacím motorům není u těchto strojů zdrojem tepla palivo spalované uvnitř válce, nachází se mimo. Teoreticky se jeho účinnost přibližuje účinnosti Carnatova cyklu, v realitě lze dosáhnout až 40%. V motoru se nachází nějaký plyn o daném objemu, který s okolním vzduchem se nesmísí a je od něho dokonale izolován. Skládá se ze 2 izochor a ze 2 izoterm: izochorický přívod tepla, izotermická expanze, izochorický odvod tepla a izotermická komprese. [11] [12]



Obrázek 7.1 Stirlingův cyklus v p-V diagramu [13]

1-2 izotermický odvod tepla

2-3 izochorický přívod tepla

3-4 izotermický přívod tepla

4-1 izochorický odvod tepla

7.3 Základní rovnice

Do Stilingova cyklu se část tepla přivádí za konstantní teplotu, takže při izotermickém ději 3-4 [14]

$$Q_H = m * r * T_H * \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (7.1)$$

Zbývající část tepla přivádí za konstantního objemu, takže při izochorickém ději 2-3 c

$$Q_{HR} = c_V * m * (T_H - T_C) \quad (7.2)$$

Část odvodu tepla se uskutečňuje za konstantní teplotu, při izotermickém ději 1-2 [14]

$$Q_C = m * r * T_C * \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (7.3)$$

Zbývající část tepla se odvádí za konstantního objemu, takže při izochorickém ději 4-1 [14]

$$Q_{CR} = c_V * m * (T_C - T_H) \quad (7.4)$$

Kvůli zjednodušení v následujícím výpočtu bude uvažován 100% regenerace tepla odvedeného za konstantního objemu. To znamená, že teplo odvedené při ději 4-1 bude přiveden bez strat při ději 2-3. Takže práce bude roven rozdílu teplot dodané a odvedené za konstantní teplotu.

Práce je rovna rozdílu tepla přivedeného a absolutní hodnoty tepla odvedeného [14]

$$A = Q_H - |Q_C| \quad (7.5)$$

Termickou účinnost Carnotova cyklu dostaneme po dosažení vztahů (7.5), (7.3), (7.1) do rovnice (2.4) a následným zjednodušením obdržíme finální vztah. [14]

$$\eta = \frac{A}{Q_H} = \frac{Q_H - |Q_C|}{Q_H} = 1 - \frac{|Q_C|}{Q_H} = 1 - \frac{\left| m * r * T_C * \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \right|}{m * r * T_H * \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)} = 1 - \frac{\left| T_C * \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \right|}{T_H * \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)} \quad (7.6)$$

Z porovnání rovnic adiabat 2-3 a 4-1 je zřejmé, že poměr objemů v rovnici (7.6) jsou stejné. Takže dosažením a dalšími úpravami lze odvodit vztah pro účinnost, z kterého je patrné, že termická účinnost je závislá pouze na teplotách, mezi kterými se cyklus pracuje. [14]

$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H} \quad (7.7)$$

7.4 Postup výpočtu

Teplo bude dodáno do cyklu ve 2 částech, za konstantního objemu $Q_{HR}=2250\text{J}$ a za konstantní teplotu $Q_H=750\text{J}$.

Z rovnici (7.2) pro výpočet přivedeného tepla za konstantní teplotu Q_{HR} lze vypočítat hmotnost vzduchu

$$m = \frac{Q_{HR}}{c_V * (T_H - T_C)} \quad (7.8)$$

Ze stavové rovnici lze vyjádřit objem V_1

$$V_1 = \frac{m * r * T_C}{p_1} \quad (7.9)$$

Tlak p_4 lze získat taky z adiabatického děje 4-1

$$V_4 = V_1 \quad (7.10)$$

Objem V_3 lze vyjádřit z rovnici (7.1) pro výpočet přivedeného tepla Q_H

$$V_3 = \frac{V_4}{\exp\left(\frac{Q_H}{m * r * T_H}\right)} \quad (7.11)$$

Pomocí Boyle-Mariotteova zákona lze vypočítat tlak p_2

$$p_2 = p_1 * \frac{V_1}{V_2} \quad (7.12)$$

Z izotermického děje 2-3 lze získat tlak p_3

$$p_3 = p_2 * \frac{T_H}{T_C} \quad (7.13)$$

Tlak p_4 lze vyjádřit z izotermického děje 3-4

$$p_4 = p_3 * \frac{V_3}{V_4} \quad (7.14)$$

Odvedené teplo pomocí vypočtených hodnot lze vypočítat z rovnice (7.3)

Účinnost lze vypočítat z rovnice (7.7)

Entropii lze vypočítat z rovnic (2.3), (7.15), (7.16), (7.17)

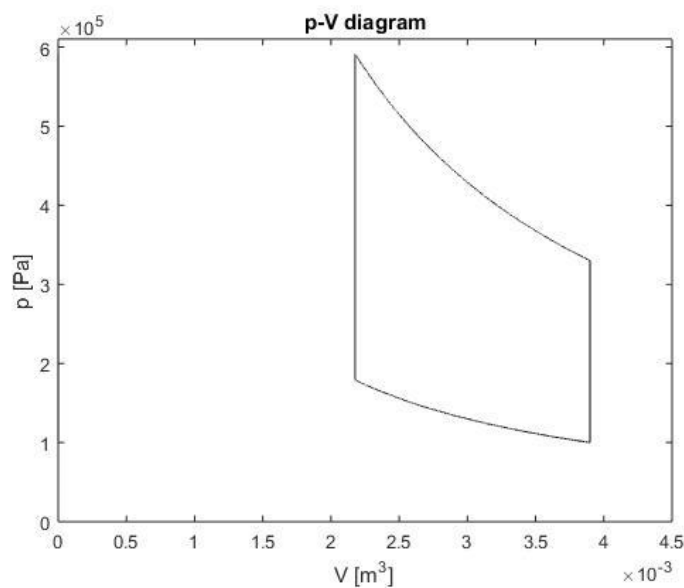
$$S_2 = S_1 + c_V * \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right) + r * \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad (7.15)$$

$$S_3 = S_2 + c_V * \ln\left(\frac{T_3}{T_2}\right) + r * \ln\left(\frac{V_3}{V_2}\right) \quad (7.16)$$

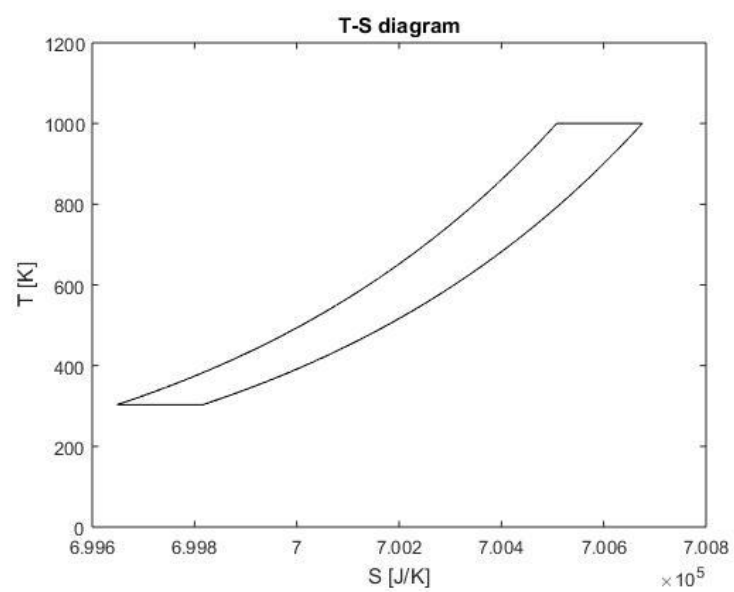
$$S_4 = S_3 + c_V * \ln\left(\frac{T_4}{T_3}\right) + r * \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (7.17)$$

Tabulka 7.1 Vypočtené parametry Stirlingova cyklu

Veličina	Hodnota [jednotka]	Veličina	Hodnota [jednotka]
p ₁	100 000 [Pa]	V ₁	0,0033 [m ³]
p ₂	179 110 [Pa]	V ₂	0,0022 [m ³]
p ₃	591 140 [Pa]	V ₃	0,0022 [m ³]
p ₄	330 030 [Pa]	V ₄	0,0033 [m ³]
T ₁	303 [K]	s ₁	699 820 [J*K ⁻¹]
T ₂	303 [K]	s ₂	699 650 [J*K ⁻¹]
T ₃	1 000 [K]	s ₃	700 510 [J*K ⁻¹]
T ₄	1 000 [K]	s ₄	700 680 [J*K ⁻¹]
η	0,697 [%]	Q _C	-227,25 [J]



Obrázek 7.2 Vykreslený p-V diagram Stirlingova cyklu



Obrázek 7.3 Vykreslený T-S diagram Stirlingova cyklu

8 Závěr

Do každého cyklu bylo dodáno stejné množství celkového tepla. Všechny cykly mají cca stejný objem mezi horním a dolním úvratím. Takže cykly se dají mezi sebou dobře porovnat.

Ze klasických cyklů má nejlepší účinnost Ottův cyklus, což je způsoben stejným kompresním poměrem. V reálné praxi Dieselův a Sabatův cyklus pracují s vyšším kompresním poměrem než Ottův. Při použití reálných kompresních poměrech Sabatův cyklus by měl největší účinnost. Lze konstatovat, že Sabatův cyklus má tím vyšší účinnost, čím blíže je k Ottovu cyklu.

Hoci Carnotův a Stirlingův cyklus pracují s menším teplotním rozdílem, mají větší účinnost. Carnotův cyklus nelze realizovat, protože během cyklu dochází k obrovským tlakům, kterých by se materiál nevydržel.

Stirlingův cyklus lze realizovat, protože tlaky nejsou tak velké. Při výpočtech byl uvažován 100% regenerátor, což v praxi není možný. Takže v reálné praxi jeho účinnost byl by mnohem menší.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BAGÁNY, Mihály. *Belsőégésű motorok*. Budapest: Typotex Kiadó, 2011. ISBN 978-963-279-656-7.
- [2] PAVELEK, Milan. *Termomechanika*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [3] Nicolaus Otto. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Nicolaus_Otto
- [4] Rudolf Diesel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2004-12-13 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Rudolf_Diesel
- [5] Mixed/dual cycle. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2006-7-9 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Mixed/dual_cycle
- [6] p-V diagram Sabateova cyklu [cit. 2018-05-20] Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6b/T_cycle_Seiliger.png
- [7] Nicolas Léonard Sadi Carnot. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-9-24 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Nicolas_L%C3%A9onard_Sadi_Carnot
- [8] Carnot-ciklus. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2007-7-23 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Carnot-ciklus>
- [9] p-V diagram Carnotova cyklu [cit. 2018-05-20] Dostupné z: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/06/Carnot_cycle_p-V_diagram.svg/750px-Carnot_cycle_p-V_diagram.svg.png
- [10] Robert Stirling. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2003-5-18 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Stirling
- [11] MACEK, Jan. *Spalovací motory*. 2. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-01-05015-6.
- [12] Stirlingmotor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2002-10-21 [cit. 2018-05-20]. Dostupné z: <https://de.wikipedia.org/wiki/Stirlingmotor>
- [13] p-V diagram Stirlingova cyklu [cit. 2018-05-20] Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Maxwell_Briggs/publication/281590001/figure/fig1/AS:284641757024258@1444875291369/P-V-and-T-S-diagrams-of-the-Ideal-Stirling-Cycle.png

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

c_p	$[J \cdot kg^{-1}]$	Tepelná kapacita za konstantního tlaku
c_v	$[J \cdot kg^{-1}]$	Tepelná kapacita za konstantního tlaku
p	$[Pa]$	Tlak
Q_H	$[J]$	Teplo přivedené do cyklu
Q_C	$[J]$	Teplo odvedené z cyklu
r	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$	Měrná plynová konstanta
S	$[J \cdot K^{-1}]$	Entropie
T	$[K]$	Termodynamická teplota
T_H	$[K]$	Nejvyšší teplota
T_C	$[K]$	Nejnižší teplota
V	$[m^3]$	Objem
ε	$[-]$	Kompresní poměr
η	$[-]$	Termická účinnost
κ	$[-]$	Poissonova konstanta
φ	$[-]$	Stupeň plnění
ψ	$[-]$	Stupeň zvýšení tlaku